Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 299-306.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 299-306.

ISSN 1680-0613

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья
УДК 543.544.5:547.814
doi: 10.17308/sorpchrom.2026.26/14177

Ион-парная ВЭЖХ антоцианов во флавилиевой форме с алкансульфонатами

Виктор Иванович Дейнека[1]✉, Владимир Федорович Селеменев[2], Татьяна Викторовна Елисеева[2], Елена Юрьевна Олейниц[1], Хайро Маурисио Культид Кабрера[1], Людмила Александровна Дейнека[1]

[1]Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия, deineka@bsu.edu.ru✉

[2]Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В работе исследовано хроматографическое поведение некоторых антоцианов в условиях ион-парной ВЭЖХ с добавками в подвижную фазу алкансульфонатов в условиях существования антоцианов во флавилиевой (положительно заряженной) форме. Показано, что, начиная с подвижной фазы с нулевой концентрацией ион-парной добавки, удерживание всех антоцианов возрастает с ростом концентрации алкансульфонатов в подвижной фазе с небольшим изменением селективности разделения стационарной фазой. Рост времен удерживания в этом случае описывается выпуклой кривой, связанной с ростом доли ионных пар в подвижной фазе. Предложено уравнение для описания зависимости времени удерживания от концентрации гептансульфоната натрия, позволяющее подгонкой определить все его параметры. При этом на самом деле, по-видимому, механизм удерживания антоцианов в этом случае является ионообменной реакцией на *in situ* превращенной обращенной фазе в катионообменную за счет сорбции алкансульфонатов привитым С18-слоем, что подтверждается уменьшением удерживания незаряженного в условиях эксперимента мирицетин-3-рамнозида с ростом концентрации ион-парной добавки. Это приводит к дополнительной смене механизма удерживания антоцианов – «поплавочный» механизм, предполагающий внедрение флавилиевой части антоцианов в привитой слой заменяется адсорбционным ионообменным. Эта гипотеза подтверждается рядом экспериментальных данных. Во-первых, на карте разделения в рамках относительного удерживания линии трендов в левой части карты для антоцианов уже не группируются по числу гидроксильных групп в кольце В (как при изменении удерживания при росте концентрации ацетонитрила). Во-вторых, на карте эффективности зависимость квадрата ширины пика от произведения фактора удерживания на фактор удерживания, увеличенный на единицу, экспериментальные точки не укладываются на прямую линию, что свидетельствует об изменении механизма сорбции. И, наконец, для относительного удерживания различных гликозидов цианидина исчезает уникальная для ВЭЖХ зависимость наклона прямых от числа моноз в гликозидном радикале, поскольку гликозидный радикал теряет свой функцию, как поплавок для внедряемой в привитой слой флавилиевой части антоцианов. При этом селективность разделения всех компонентов также мало изменяется с ростом концентрации ион-парной добавки в подвижной фазе. Следовательно, ион-парная обращенно-фазовая ВЭЖХ является хорошей альтернативой традиционной обращенно-фазовой ВЭЖХ с предсказуемой селективностью разделения антоцианов.

Ключевые слова: ион-парная, обращенно-фазовая, ВЭЖХ, алкансульфонаты, закономерности удерживания.

Для цитирования: Дейнека В.И., Селеменев В.Ф., Елисеева Т.В., Олейниц Е.Ю., Культид Кабрера Х.М., Дейнека Л.А. Ион-парная ВЭЖХ антоцианов во флавилиевой форме с алкансульфонатами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2026. Т. 26, № 2. С. 299-306. https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14177

Original article

Ion-pair HPLC of anthocyanins in the flavylium form with alkanesulfonates

© Дейнека В. И., Селеменев В. Ф., Елисеева Т. В., Олейниц Е. Ю., Культид Кабрера Х. М., Дейнека Л. А., 2026

Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 299-306.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 299-306.

ISSN 1680-0613

Viktor I. Deineka[1]✉, Vladimir F. Selemenev[2], Tatyana V. Eliseeva[2], Elena Yu. Oleinits[1], J.M. Kultid Cabrera[1], Lyudmila A. Deineka[1]

[1]Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, deineka@bsu.edu.ru✉
[2]Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

Abstract. The chromatographic behavior of selected anthocyanins under ion-pair HPLC conditions with alkanesulfonate additives in the mobile phase was investigated while the anthocyanins existed in the flavylium (positively charged) form. It was shown that starting from a mobile phase with zero concentration of the ion-pair additive, the retention of all anthocyanins increases with increasing alkanesulfonate concentration in the mobile phase, with a small change in the separation selectivity of the stationary phase. The increase in retention times in this case is described by a convex curve associated with an increase in the proportion of ion pairs in the mobile phase. An equation is proposed to describe the dependence of retention time on sodium heptanesulfonate concentration, allowing all its parameters to be determined by fitting. In reality, however, the retention mechanism of anthocyanins in this case appears to be an ion-exchange reaction on an in situ converted reversed phase into a cation-exchange phase due to the sorption of alkanesulfonates by the grafted C18 layer, which is confirmed by the decrease in retention of myricetin-3-rhamnoside (uncharged under the experimental conditions) with increasing concentration of the ion-pair additive. This leads to an additional change in the retention mechanism of anthocyanins, the "float" mechanism, which involves the insertion of the flavylium part of anthocyanins into the grafted layer, is replaced by adsorption ion exchange. This hypothesis is supported by a number of experimental findings. First, on the separation map in terms of relative retention, the trend lines in the left part of the map for anthocyanins no longer group according to the number of hydroxyl groups in the B ring (as occurs when retention changes with increasing acetonitrile concentration). Second, on the efficiency map, the dependence of the square of the peak width on the product of the retention factor and the retention factor plus one does not fit the experimental points to a straight line, indicating a change in the sorption mechanism. Finally, for the relative retention of various cyanidin glycosides, the unique HPLC dependence of the slope of the lines on the number of monosaccharides in the glycosidic radical disappears because the glycosidic radical loses its function as a float for the flavylium part of anthocyanins inserted into the grafted layer. At the same time, the separation selectivity of all components also changes little with increasing concentration of the ion-pair additive in the mobile phase. Consequently, ion-pair reversed-phase HPLC is a good alternative to traditional reversed-phase HPLC with predictable separation selectivity for anthocyanins.

Keywords: ion-pair, reversed-phase, HPLC, alkanesulfonates, retention patterns.
For citation: Deineka V.I., Selemenev V.F., Eliseeva T.V., Oleinits E.Yu., Kultid Cabrera Kh.M., Deineka L.A. Ion-pair HPLC of anthocyanins in the flavylium form with alkanesulfonates. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2026. 26(2): 299-306. (In Russ.). https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14177

Введение

База данных Google Академия выдает 160 000 публикаций на запрос «anthocyanins and HPLC», что указывает на накопление значительного опыта во всем мире по разделению антоцианов методом обращенно-фазовой ВЭЖХ. Удивительно, но нами обнаружена только одна публикаций по ион-парной обращенно-фазовой ВЭЖХ антоцианов [1], причем неожиданная по поставленным задачам. Дело в том, что при pH 2, использованном при приготовлении подвижной фазы в цитируемой работе, антоцианы находятся преимущественно во флавилиевой, т.е. положительно заряженной форме [2], и использование авторами катионной ион-парной добавки трудно понять. Положительно заряженные частицы образуют ионные пары только с алкансульфонатами, как и трифторацетатами или перхлоратами [3]. Поэтому не совсем понятна цель работы по изучению хроматографического поведения антоцианов на колонках смешанного типа – с обращенно-фазовой и анионообменной активностями [4]. Следует упомянуть любопытную работу [5], в которой антоцианы винограда разделяли нормально-фазовой ион-парной хроматографией, но уже с гептансульфоновой кислотой.

В большом количестве различных типов подвижных фаз, используемых в публикациях по обращенно-фазовой ВЭЖХ антоцианов в положительно флавилиевой форме использование ион-парных добавок не обсуждается, см. обзоры [6-8],

хотя удерживание антоцианов гидрофобными привитыми фазами не тривиально. Действительно, положительный заряд обеспечивает антоцианам во флавилиевой форме высокую гидрофильность: по нашему наблюдению высохшие на дне стаканов образцы экстрактов антоцианов плохо смываются водой, но мгновенно - при добавлении подкисленной воды. При этом закономерности сорбции антоцианов в этой форме могут быть объяснены только с использованием «поплавочной» модели [9], при которой флавилиевая часть антоциана проникает в гидрофобную привитую фазу. Если для подкисления используют муравьиную кислоту, то можно предположить, что существующие в подвижной фазе формиат-ионы образуют ионные пары, обеспечивая указанное проникновение в привитую фазу, но это трудно доказать, поскольку большая часть муравьиной кислоты выполняет функцию не только подкислителя, но и органического модификатора, обладающего значительной элюирующей способностью [10]. Это удерживание может быть следствием достаточно высокой «остаточной» гидрофобности антоцианов в этой форме. Однако замена муравьиной кислоты на ортофосфорную мало что изменяет кроме снижения элюирующей силы [10]. Наконец, в работе [11] было показано, что удерживание антоцианов возможно без специальных добавок и в хиноноидных формах антоцианов.

Настоящая работа посвящена разработке составов подвижных фаз с алкансульфонатами в качестве ион-парных добавок для записи хроматограммы в условиях обращенно-фазовой ВЭЖХ.

Экспериментальная часть

В работе использовали содержащие антоцианы и очищенные методом твердофазной экстракции из коллекции лаборатории из листьев багрянника канадского (*Cercis canadinsis)*, плодов барбариса (*Berberis vulgaris)* и красной смородины (*Ribes rubrum)*.

Использовали хроматограф Agilent 1260 Infinity с диодно-матричным детектором. Колонки: 150×4.6 мм Symmetry^{TM}C18, 3.5 мкм; 150×4.6 мм InertSustain, 5 мкм и 250×4.0 мм Reprosil C8. Для приготовления подвижных фаз использовали: ацетонитрил (for HPLC & Spectroscopy, Central Drag House, India), муравьиную кислоту 85% (ч, РЕАХИМ), кислоту ортофосфорную (чда, РЕАХИМ), дистиллированную воду, 1-гексансульфонат натрия и 1-гептансульфонат натрия (ХИММЕД).

Обсуждение результатов

Удерживание 3-глюкозидов шести наиболее распространенных в природе антоцианидинов: дельфинидина (Dp3Glu), цианидина (Cy3Glu), петунидина (Pt3Glu), пеонидина (Pn3Glu) и мальвидина (Mv3Glu) – из листьев багрянника канадского, а в некоторых случаях и пеларгонидина (Pg3Glu) – из плодов барбариса, с ростом концентрации гексансульфоната натрия в подвижной фазе, содержащей 12 об. % ацетонитрила и 10 об. % муравьиной кислоты в воде, возрастает, как и следовало предполагать, при введении в подвижную фазу анионной ион-парной добавки, рис. 1.

Однако, при заметном росте удерживания каждого антоциана селективность разделения любых пар смеси относительно мало изменяется с ростом концентрации ион-парной добавки, табл. 1. Замена гексансульфоната на гептансульфонат приводит к заметному увеличению удерживания всех антоцианов. Рост удерживания с ростом концентрации ион-парной добавки наблюдается и при использовании С8 колонки.

При этом с ростом концентрации ион-парной добавки селективность по отношению к Pg3Glu при добавлении ОН-групп несколько возрастает, а при добавлении CH_3O-групп несколько уменьшается. Но в целом за счет внесения ион-парных добавок в подвижную фазу можно

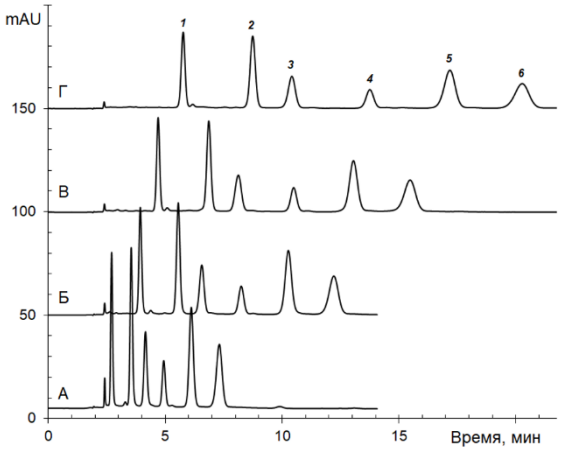


Рис. 1. Хроматограммы пяти 3-глюкозидов в условиях ион-парной обращенно-фазовой хроматографии

Подвижные фазы содержат 12 об. % CH_3CN, 10 об. % HCOOH в воде с добавками н-гексансульфоната натрия в концентрациях А – 0, Б – 0.0025, В – 0.0050, Г – 0.0100 моль/дм^3, 0.8 см^3/мин. Колонка: 150×4.6 мм, Symmetry^{TM}C18, 3.5 мкм, температура 40^{o}C. Запись хроматограмм при 515 нм. Вещества: 1 – Dp3Glu, 2 – Cy3Glu, 3 – Pt3Glu, 4 – Pg3Glu, 5 – Pn3Glu, 5 – Mv3Glu.

Fig. 1. Chromatograms of five 3-glucosides under ion-pair reversed-phase chromatography conditions.

Mobile phases contain 12 vol. % CH_3CN, 10 vol. % HCOOH in water with additives of sodium n-hexanesulfonate at concentrations A – 0, B – 0.0025, C – 0.0050, D – 0.0100 mol/L, 0.8 mL/min. Column: 150×4.6 mm, Symmetry™ C18, 3.5 µm, temperature 40°C. Detection at 515 nm. Compounds: 1 – Dp3Glu, 2 – Cy3Glu, 3 – Pt3Glu, 4 – Pg3Glu, 5 – Pn3Glu, 6 – Mv3Glu.

Таблица 1. Факторы удерживания и селективность по отношению к Pg3Glu антоцианов в условиях: подвижные фазы содержат 12 об. % CH_3CN, 10 об. % HCOOH в воде с добавками н-гексансульфоната натрия в концентрациях А – 0, Б – 0.0025, В – 0.0050, Г – 0.0100 моль/дм^3, 0.8 см^3/мин. Колонка: 150×4.6 мм, Symmetry^{TM}C18, 3.5 мкм, температура 40^{o}C.

Table 1. Retention factors and selectivity relative to Pg3Glu of anthocyanins under conditions: mobile phases contain 12 vol. % CH_3CN, 10 vol. % HCOOH in water with additives of sodium n-hexanesulfonate at concentrations A – 0, B – 0.0025, C – 0.0050, D – 0.0100 mol/L, 0.8 mL/min. Column: 150×4.6 mm, Symmetry™ C18, 3.5 µm, temperature 40°C.

№	Параметр:	Факторы удерживания, k				Селективность k(i)/k(4)			
	c×10^3, моль/дм^3*	0	2.5	5.0	10.0	0	2.5	5.0	10.0
1	Dp3G	0.430	1.079	1.480	2.045	0.267	0.321	0.326	0.327
2	Cy3G	0.872	1.934	2.623	3.615	0.543	0.576	0.578	0.578
3	Pt3G	1.194	2.465	3.29	4.498	0.743	0.735	0.725	0.719
4	Pg3G	1.606	3.355	4.539	6.258	1	1	1	1
5	Pn3G	2.227	4.419	5.888	8.066	1.386	1.317	1.297	1.289
6	Mv3G	2.860	5.445	7.167	9.696	1.781	1.623	1.579	1.549

*c - концентрация гексансульфоната натрия в подвижной фазе, содержащей 10 об.% HCOOH и 12 об.% CH_3CN в воде.

увеличить удерживание антоцианов без существенного изменения селективности по сравнению с селективностью без ион-парных добавок.

Предполагая, что исправленное время удерживания антоцианов определяется исправленным временем удерживанием флавилиевых ионов, Fl^+, не образовавших ионную пару, умноженным на долю этой формы в элюенте, плюс исправленное время удерживания ионной пары, ИП, умноженное на долю такой пары в подвижной фазе, определим удерживание флавиливых ионов:

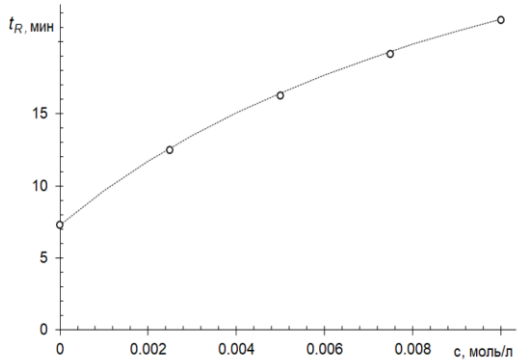


Рис. 2. Зависимость удерживания Mv3Glu от концентрации гептансульфоната натрия в подвижной фазе

Подвижные фазы содержат 18 об. % ацетонитрила, 1 об. % ортофосфорной кислоты в воде с добавками *н*-гептансульфоната натрия. Колонка: 150×4.6 мм, InertSustain C18, 5 мкм, температура 40 °C.

Fig. 2. Dependence of Mv3Glu retention on sodium heptanesulfonate concentration in the mobile phase.

Mobile phases contain 18 vol. % acetonitrile, 1 vol. % orthophosphoric acid in water with additives of sodium n-heptanesulfonate. Column: 150×4.6 mm, InertSustain C18, 5 μm, temperature 40°C

$$t'_R \sum Fl^+ = t'_R\,(Fl^+) \cdot \alpha(Fl^+) + t'_R(\text{ИП}) \cdot \alpha(\text{ИП}) + t_M,$$

где t_M – мертвое время системы. С использованием равновесия образования ионной пары

$$Fl^+ + I^- \leftrightarrow Fl^+I^-,$$

$$K_{\text{ИП}}(i) = \frac{[\text{ИП}]}{[Fl^+]\cdot[I^-]},$$

получаем уравнение для времени удерживания антоциана:

$$t_R(i) = \frac{t'_R(Fl^+) + t'_R(\text{ИП})\cdot K_{\text{ИП}}(i)}{1 + K_{\text{ИП}}(i)} + t_M.$$

В данном уравнении имеется только два подгоняемых параметра, поэтому оно может быть использовано для расчета константы образования ионной пары компонента *i* с противоионом. Эффективность обработки экспериментальных данных по предложенному уравнению показана на рис. 2. Это неожиданно, поскольку наиболее вероятно то, что использованная ион-парная добавка, имеющая длинный алкильный радикал, внедряется в привитую фазу, и сорбируется не сама ионная пара, а флавилиевый ион на *in situ* сгенерированном катионообменнике. Действительно, в настоящей работе было обнаружено уменьшение времени удерживания незаряженного флавоноида миристин-3-рамнозида (экстрагируемого вместе с антоцианами из листьев багрянника канадского [12]) по мере роста концентрации гептансульфоната натрия в подвижной фазе. В таком случае поплавочный механизм удерживания должен заменяться ионообменным при поверхностной сорбции на генерированной *in situ* привитой фазе.

Это предположение подтверждается рядом экспериментальных фактов. Во-первых, на картах разделения второго типа [13] удерживание (в виде десятичного логарифма фактора удерживания) антоцианов в нескольких составах подвижной фазы с изменяемой концентрацией компонента, влияющего на их удерживание, определяется относительно антоциана, принятого в качестве вещества сравнения. Для всех исследованных в нашей лаборатории элюентных систем [10], содержащих органический модификатор и кислоту в воде, на колонках с октадецилсилановыми группами на картах этого типа линии трендов при экстраполяции удерживания на подвижные фазы с высокой элюирующей способностью стремятся сгруппироваться по числу гидроксильных групп в кольце B (схема 1).

Однотипные производные мальвидина, пеонидина и пеларгонидина (если он добавлен в смесь) составляют первую

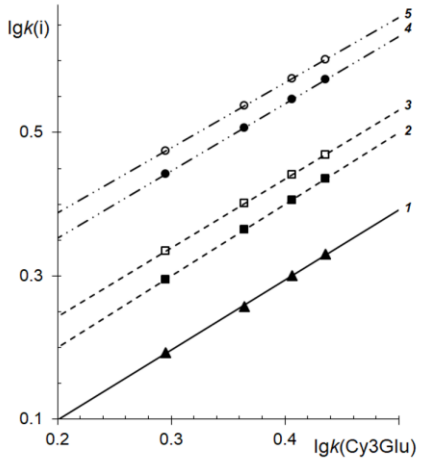
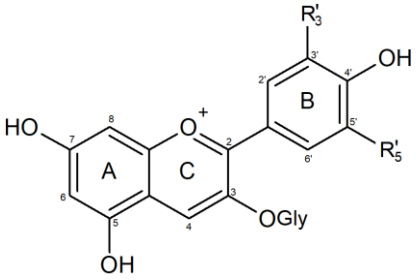


Рис. 3. Карта разделения пяти 3-глюкозидов в условиях роста концентрации гептансульфоната натрия в элюенте, содержащем 18 об. % CH_3CN и 1 об. % H_3PO_4 в воде на колонке InertSustain C18.

Fig. 3. Separation map of five 3-glucosides under conditions of increasing sodium heptanesulfonate concentration in the eluent containing 18 vol. % CH_3CN and 1 vol. % H_3PO_4 in water on an InertSustain C18 column.



		R'3	R'5
пеларгонидин	Pg	H	H
пеонидин	Pn	OCH_3	H
мальвидин	Mv	OCH_3	OCH_3
цианидин	Cy	OH	H
петунидин	Pt	OCH_3	OH
дельфинидин	Dp	OH	OH

Схема 1. Строение 3-гликозидов антоцианидинов

Scheme 1. Structure of 3-glycosides of anthocyanidins

группу с одной гидроксильной группой в кольце B, такие же производные петунидина и цианидина составляют вторую группу с двумя OH-группами в этом кольце, а в третью группу входит только производное дельфинидина. При этом в кольцах A и C всех указанных производных имеется одинаковое число гидроксильных групп. Но если гидроксильная группа добавляется в положение 6 кольца A, то это добавление (в соответствии с «поплавочным» механизмом сорбции антоцианов) эквивалентно добавлению OH-групп в кольцо B [9]. Т.е. такой анализ является уникальным хроматографическим способом контроля числа гидроксильных групп в антоцианах.

Однако, в рассматриваемом случае на карте разделения по мере роста концентрации добавки гептансульфоната, указанная выше тенденция не соблюдается, рис. 3, а такая ситуация в наших работах была обнаружена только при разделении антоцианов на истинно полимерной (сополимер стирола и дивинилбензола) стационарной фазе [14], для которой возможен только адсорбционный механизм. Т.е. сорбция антоцианов в ион-парной хроматографии с добавкой гептансульфоната осуществляется преимущественно по адсорбционному механизму.

Второй способ обнаружения особенностей удерживания антоцианов в рассматриваемом случае – анализ карт эффективности. Для всех вариантов удерживания антоцианов в традиционной обращенно-фазовой хроматографии квадрат ширины пиков на середине высоты

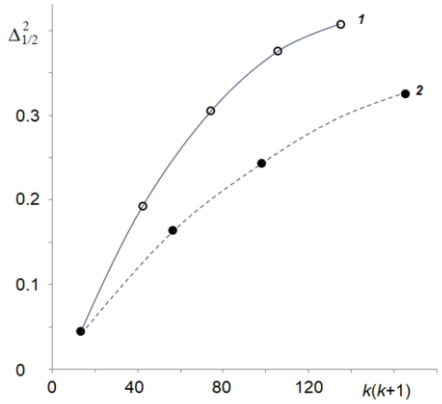


Рис. 4. Зависимость квадрата ширины пика Mv3Glu на хроматограммах ион-парной ВЭЖХ с добавками гептансульфоната натрия в элюентах, содержащих 18 об. % CH_3CN и 1 об.% H_3PO_4 в воде на колонке InertSustain C18 (1) и Kromasil 100-5C8 (2).
Fig. 4. Dependence of the square of the peak width of Mv3Glu on ion-pair HPLC chromatograms with sodium heptanesulfonate additives in eluents containing 18 vol. % CH_3CN and 1 vol.% H_3PO_4 in water on an InertSustain C18 column (1) and a Kromasil 100-5C8 column (2).

Таблица 2. Параметры уравнения (1) 3-гликозидов цианидина при росте концентрации гептансульфоната натрия в подвижной фазе 12 об. % ацетонитрила и 10 об. % муравьиной кислоты в воде для колонки Reprosil C8 при температуре 40ºC.
Table 2. Parameters of equation (1) for 3-glycosides of cyanidin with increasing concentration of sodium heptanesulfonate in the mobile phase (12 vol. % acetonitrile and 10 vol. % formic acid in water) for a Reprosil C8 column at 40°C.

Антоциан	Состав по монозам	a_1	a_0
3-глюкозид	Глюкоза	1.000	0
3-софорозид	Глюкоза + глюкоза	1.051	-0.229
3-самбубиозид	Глюкоза + ксилоза	0.969	-0.069
3-рутинозил	Глюкоза + рамноза	0.954	0.049
3-глюкозилрутинозид	Глюкоза + рамноза + глюкоза	1.007	-0.235
3-ксилозидлутинозид	Глюкоза + рамноза + ксилоза	0.959	-0.069

линейно зависит от произведения фактора удерживания на фактор удерживания, увеличенный на единицу [15]. Но в рассматриваемом случае этот график представляет собой выпуклую кривую, рис. 4, что может быть связано с постепенной сменой механизма сорбции по мере заполнения поверхности гептансульфонатом.

Наконец, если удерживание антоцианов осуществляется по адсорбционному механизму, то гликозидные заместители теряют роль «поплавка». И действительно, для производных цианидина с различными гликозидными заместителями уже не наблюдается характерный для удерживания антоцианов в условиях традиционной обращенно-фазовой хроматографии [13] рост наклона линий трендов по уравнению:

$$\lg k(\text{i}) = a_0 + a_1 \cdot \lg k(\text{Cy3Glu}). \quad (1)$$

Вместо обычного роста параметра a_1 на 0.100±0.02 для дигликозидов и на 0.20±0.02 для тригликозидов получены близкие результаты для всех шести различных гликозидов, табл. 2, с мало изменяемой, т.е. предсказуемой, селективностью.

Заключение

Таким образом, ион-парная обращенно-фазовая хроматография с использование алкансульфонатов является ценной альтернативой традиционной обращенно-фазовой хроматографии с мало зависящим от концентрации ион-парной

добавки, поэтому прогнозируемой селективностью разделения сложных смесей антоцианов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Peña A., Garcia V., de la Luz Romero Ma., Capella S. *J. Chromatogr. Sci*. 1997; 35: 161-164. https://doi.org/10.1093/chromsci/35.4.161
2. Trouillas P., Sancho-García J.C., De Freitas V. Gierschner J., Otyepka M., Dangles O. *Chem Rev.* 2016; 116: 4937-4982. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00507.
3. Yue Z.-X., Gu Y.-X., Yan T.-C., Li M.-H., Zheng H., Cao J.. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2022; 208: 114467. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114467
4. Jin H., Liu Y., Guo Z., Yang F., Wang J., Li X., Peng X., Liang X. *J. Agric. Food Chem*. 2015; 63: 500-508. https://doi.org/10.1021/jf504525w.
5. Kennedy J.A., Waterhouse A.L. *J. Chromatogr. A.* 2000; 866: 25-34. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)01038-9.
6. Singh M.C., Kelso C., Price W.E., Probst Y.. *Food Res. Int.* 2020; 138: 109754. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109754
7. Valls J., Silvia M., Martí M.P., Borras E., Arola L. A *J. Chromatogr. A*. 2009; 1216: 7143-7172. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.07.030/
8. Lee H.S., Hong V. *J. Chromatogr*. 1992; 624: 221-234. https://doi.org/10.1016/0021-9673(92)85681-I.
9. Deineka V.I., Deineka L.A., Saenko I.I., Chulkov A.N. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2015; 89: 1300-1304. https://doi.org/10.1134/S0036024415070079.
10. Deineka V.I., Oleinits E.Y., Kulchenko Y.Y., Blinova I.P., Deineka L.A. . *Russ. J. Phys. Chem.* 2021; 95: 1729-1734. https://doi.org/10.1134/S0036024421080094
11. Deineka V.I., Kul'chenko Ya.Yu., Deineka L.A. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2019; 93: 572-576. https://doi.org/10.1134/S0036024419030038.
12. Salatino A., Salatino M.L.F., Giannasi D.E. *Biochem. System. Ecol.* 2000; 28: 545-550. https://doi.org/10.1016/S0305-1978(99)00093-9.
13. Deineka V.I., Oleinits E.Yu., Blinova I.P., Deineka L.A. *Russ. J. Phys. Chem.* A. 2022; 96: 1768-1772. https://doi.org/10.1134/S0036024422080076
14. Dejneka V.I., Makarevich S.L., Dejneka L.A., Doronin A.G., Selemenev V.F. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2014; 14: 614-620. (in Russ.)
15. Deineka V.I., Blinova I.P. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2023; 97: 2577-2581. https://doi.org/10.1134/S0036024423110067.

Информация об авторах / Information about the authors

В.И. Дейнека – д.х.н., профессор кафедры общей химии института фармации, химии и биологии НИУ БеГУ

В.Ф. Селеменев – д.х.н., проф. каф. аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
Т.В. Елисеева – к.х.н., зав. кафедрой аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
Е.Ю. Олейниц – к.х.н., доцент кафедры общей химии института фармации, химии и биологии НИУ БеГУ

Х.М. Культид Кабрера – аспирант института фармации, химии и биологии НИУ БеГУ
Л.А. Дейнека – к.х.н., доцент кафедры общей химии института фармации, химии и биологии НИУ БеГУ

V.I. Deineka – Dr.Sci. (Chemistry), Professor of General Chemistry Department of Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of Belgorod State University
V.F Selemenev – DSci in chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: common@chem.vsu.ru

T.V. Eliseeva – Head of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia,
E.Yu. Oleinits – Ph.D, Associate Professor of General Chemistry Department of Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of Belgorod State University
J.M. Kultid Cabrera – postgraduate of Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of Belgorod State University
L.A. Deineka – Ph.D, Associate Professor of General Chemistry Department of Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of Belgorod State University

Статья поступила в редакцию 21.12.2025, одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 21.12.2025; approved after reviewing 03.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.